

ОДНОЛЬКО Д. С.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ БЕЗДАТЧИКОВОГО ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Белорусский национальный технический университет

Разработана математическая имитационная модель системы косвенного бездатчикового векторного управления асинхронным двигателем. Исследована чувствительность системы электропривода к параметрическим возмущениям, в частности, к изменениям активных сопротивлений статора и ротора двигателя. Представлен анализ качества работы системы: точности оценивания угловой скорости ротора и стабильности динамических свойств системы, при использовании алгоритмов параметрической идентификации асинхронного двигателя и без них.

Введение

В системах векторного управления без датчика скорости (бездатчиковых системах), в зависимости от их структуры, возможна различная чувствительность к параметрическим возмущениям асинхронного двигателя (АД). Известны структуры [1] бездатчикового управления с низкой чувствительностью к изменениям электромагнитных параметров АД, сохраняющие приемлемые динамические показатели во всем диапазоне изменений электромагнитных параметров. Однако обеспечение робастности к параметрическим возмущениям в таких системах сопряжено с трудностями синтеза управления.

Вместе с тем, на практике часто находят применения системы косвенного бездатчикового векторного управления [2], недостатком которой является высокая чувствительность к изменениям параметров. Преимущества таких систем: простая структура наблюдателя скорости и более простые методы синтеза управления. Для повышения качества работы таких систем, необходимо применять алгоритмы параметрической идентификации двигателя [3], что позволит отслеживать изменения параметров и корректировать настройки наблюдателя скорости и регуляторов. Учитывая высокую производительность микропроцес-

сорной техники, на основании которой реализуется в настоящее время управление в электроприводе (ЭП) [4], возможно обеспечить согласованную работу алгоритмов идентификации и алгоритмов управления приводом.

В процессе функционирования частотно-регулируемого ЭП наиболее сильно (в 2 раза [3]) могут изменяться активные сопротивления статора и ротора. Изменение же индуктивностей не так существенно. Изменения активных сопротивлений статора и ротора АД по сравнению с расчетными влияет не только на динамические показатели ЭП, а так же и на энергетические характеристики АД. Так, с увеличением сопротивлений мощность двигателя уменьшается, изменяется его механическая характеристика, уменьшается критический момент. При уменьшении сопротивлений располагаемая мощность АД возрастает, однако снижается запас устойчивости системы ЭП. Следовательно, даже при идеально точном учете изменений параметров система ЭП не станет инвариантна к их изменениям. Однако, возможно улучшение динамических свойств в условиях параметрических возмущений. Таким образом, применение идентификации и перенастройка устройства управления по ее результатам должны улучшить качество функционирования системы бездатчикового косвенного векторного управления.

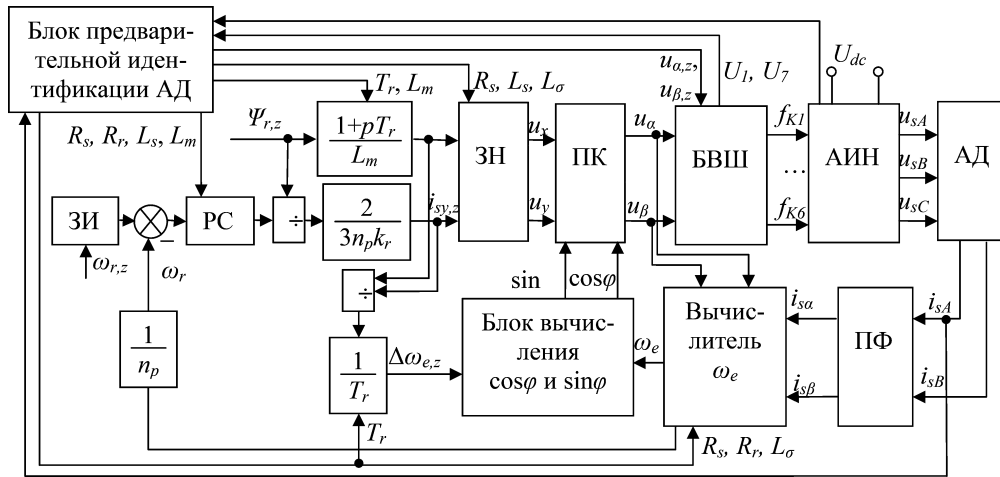


Рисунок 1. - Функциональная схема косвенного бездатчикового векторного управления ЭП: ЗИ – датчик интенсивности; РС – регулятор скорости; ЗН – блок задания напряжения; ПК – блок прямого преобразования координат; ПФ – блок прямого преобразования фаз; БВШ – блок векторной ШИМ; АИН – автономный инвертор напряжения; АД – асинхронный двигатель

В данной работе ставится задача исследовать чувствительность системы косвенного бездатчикового векторного управления к точности информации о активных сопротивлениях АД методом имитационного моделирования. Цель таких исследований заключается в том, чтобы установить степень повышения качества работы бездатчикового электропривода (ЭП): точности вычисления угловой скорости ротора и стабильности динамических свойств системы, при использовании алгоритмов параметрической идентификации АД в условиях возможных изменений его активных сопротивлений [5].

1. Модель системы косвенного бездатчикового векторного управления асинхронным двигателем

Структура ЭП с косвенным бездатчиковым векторным управлением, известная из литературных источников, например [2], на основании которой синтезирована имитационная модель (ИМ) в среде MATLAB, показана на рисунке 1.

Блок предварительной идентификации реализован программно в виде m-функции MATLAB согласно алгоритма, который представлен и подробно исследован в [3, 6].

Блоки ПФ и ПК выполняют фазные и координатные преобразования электрических переменных. При косвенном векторном управлении отсутствуют регуляторы тока, а обратная связь в ЭП осуществляется через электриче-

ский угол φ поворота вектора потокосцепления ротора. Этот электрический угол вычисляется по формуле [2, с. 238, формула (9.35)]

$$\varphi = \int_0^t (\omega_e + \Delta\omega_{e,z}) dt,$$

где ω_e – угловая электрическая скорость ротора; $\Delta\omega_{e,z}$ – заданное абсолютное электрическое скольжение.

В блоке ЗН определяются заданные значения напряжений u_x, u_y , соответствующие заданным значениям токов [2, с. 240, формула (9.47)]

$$\begin{cases} u_x = i_{sx,z}R_s + L_s (di_{sx,z}/dt) - \omega_1 L_\sigma i_{sy,z}, \\ u_y = i_{sy,z}R_s + L_\sigma (di_{sy,z}/dt) + \omega_1 L_s i_{sx,z}, \end{cases}$$

где $i_{sx,z}, i_{sy,z}$ – намагничивающая и моментная составляющие вектора тока статора.

Вычисление скорости выполняется согласно [2, с. 245, формула (9.66)]

$$\begin{aligned} \omega_e &= \omega_0 - \Delta\omega_{e,z} = \\ &= \omega_0 \frac{e_{r\alpha}^2 + e_{r\beta}^2}{e_{r\alpha}^2 + e_{r\alpha}^2 + k_r R_r (i_{s\alpha} e_{r\alpha} + i_{s\beta} e_{r\beta})}, \end{aligned}$$

где ω_0 – синхронная угловая частота вращения магнитного поля; $e_{r\alpha}, e_{r\beta}$ – составляющие ЭДС ротора

$$\begin{cases} e_{r\alpha} = 1/k_r (u_{s\alpha} - i_{s\alpha}R_s - L_\sigma (di_{s\alpha}/dt)), \\ e_{r\beta} = 1/k_r (u_{s\beta} - i_{s\beta}R_s - L_\sigma (di_{s\beta}/dt)). \end{cases}$$

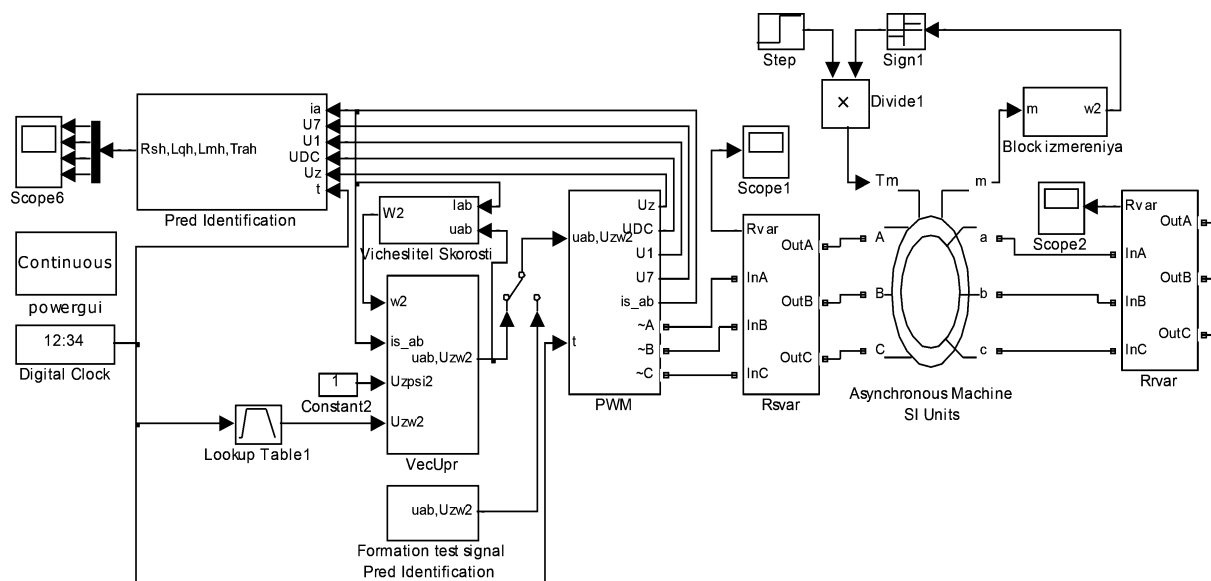


Рисунок 2. - ИМ системы косвенного бездатчикового векторного управления ЭП

В качестве регулятора скорости выбран ПИ-регулятор. В качестве малой некомпенсированной постоянной времени принята эквивалентная постоянная времени T_3 . При данных условиях ПИ-регулятор скорости имеет вид

$$W_{PC}(p) = A_{PC} + B_{PC}(p) = \frac{JR_3}{4T_3K_M} + \frac{1}{8T_3p},$$

где A_{PC} – пропорциональная составляющая регулятора; B_{PC} – интегральная составляющая регулятора; R_3 – эквивалентное сопротивление; T_3 – эквивалентная постоянная времени.

На рисунке 2 представлена ИМ рассматриваемой системы ЭП.

ИМ состоит из ряда отдельных подсистем: подсистемы «Formation test signal Pred Identification», формирующей тестовый сигнал в режиме предварительной параметрической идентификации АД; подсистемы «Pred Identification», включающей программное обеспечение предварительной параметрической идентификации АД; подсистемы «VecUpr», реализующей алгоритм косвенного бездатчикового векторного управления АД; подсистемы «PWM», которая формирует напряжение по принципу векторной ШИМ; подсистем «Rsvr» и «Rrvar», предназначенных для имитации переменных активных сопротивлений АД.

На ИМ переключение между режимом предварительной параметрической идентификацией АД и режимом частотного векторного управления АД осуществляется по средством блока «Manual Switch».

2. Имитационное моделирование режимов работы системы бездатчикового векторного управления в условиях параметрических возмущений при выполнении параметрической идентификации АД и без нее

Имитационное моделирование выполнено для двигателей нескольких мощностей: АИР90L4 (2,2 кВт), АИР132М4 (11 кВт), АИР315S4 (160 кВт). Условия моделирования выбраны следующие: переменный шаг моделирования, метод интегрирования ode15s, длительность интервала дискретности цифрового управления $\Delta t = 10^{-5}$ с, частота ШИМ $f = 1$ кГц, напряжение звена постоянного тока $U_{dc} = 570$ В, момент нагрузки $M_c = 0,5M_n$.

Далее представлены результаты моделирования системы косвенного бездатчикового векторного управления для двигателя АИР90L4 (2,2 кВт).

Чувствительность системы косвенного бездатчикового векторного управления к изменениям активных сопротивлений двигателя исследовалась при выполнении параметрической идентификации АД и без нее. Начальные значения активных сопротивлений статора и ротора равны $R_{s, kat} \leftrightarrow 3,79$ Ом, $R_{r, kat} \leftrightarrow 2,78$ Ом.

На рисунке 3 представлены графики, характеризующие работу двигателя модели АИР90L4 в системе косвенного бездатчикового векторного управления, при выполнении параметрической идентификации АД.

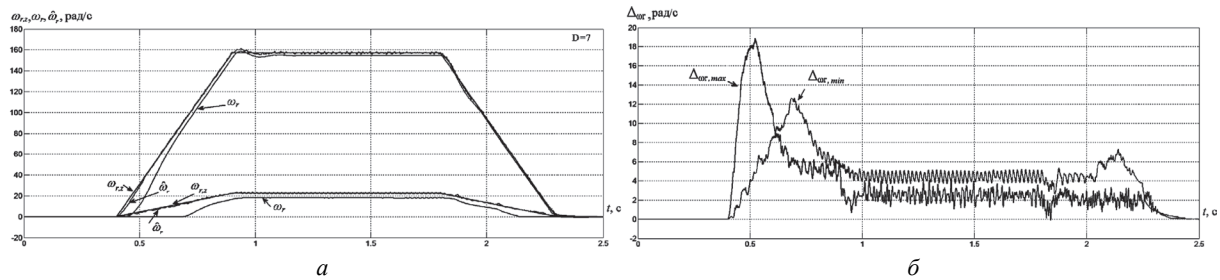


Рисунок 3. - Работа двигателя АИР90Л4 в системе косвенного бездатчикового векторного управления при $f = 1$ кГц, $U_{dc} = 570$ В, $M_c = 0,5M_n$, значениях активных сопротивлений статора и ротора равных $1,5R_{s, kat}$, $1,5R_{r, kat}$ и выполнении параметрической идентификации АД: а – заданная, фактическая и вычисленная угловые скорости ротора вверх/вниз диапазона регулирования; б – абсолютная ошибка вычисления угловой скорости ротора

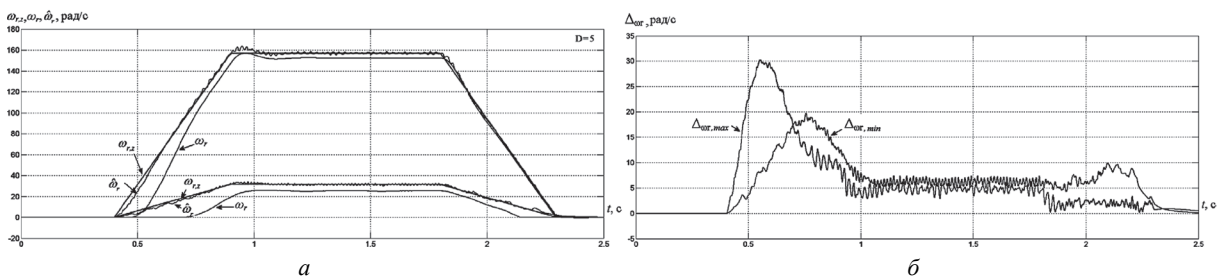


Рисунок 4. - Работа двигателя АИР90Л4 в системе косвенного бездатчикового векторного управления при $f = 1$ кГц, $U_{dc} = 570$ В, $M_c = 0,5M_n$, значениях активных сопротивлений статора и ротора равных $1,5R_{s, kat}$, $1,5R_{r, kat}$ без выполнения параметрической идентификации АД: а – заданная, фактическая и вычисленная угловые скорости ротора вверх/вниз диапазона регулирования; б – абсолютная ошибка вычисления угловой скорости ротора

На графиках отражены изменения заданного значения угловой скорости ротора $\omega_{r,z}$, вычисляемой в наблюдателе угловой скорости $\hat{\omega}_r$ и фактической скорости ω_r , а также абсолютной ошибки вычисления скорости $\Delta_{\omega r, max}$, $\Delta_{\omega r, min}$, соответствующие максимальной и минимальной скорости диапазона регулирования D . В процессе работы системы вычисляемая угловая скорость ротора $\hat{\omega}_r$ отличается от фактической ω_r , при этом стремится к заданному значению $\omega_{r,z}$. Кривые изменения скорости представлены для случая задания максимальной и минимальной скорости диапазона регулирования, который в рассматриваемом случае составил $D = 7$.

На рисунке 4 представлены графики для случая, когда частотный привод работает в условиях изменения активных сопротивлений статора и ротора без выполнения параметрической идентификации АД.

Анализ результатов имитационного моделирования позволяют сделать некоторые выводы. Так выполнение параметрической идентификации АД, при которой определяются, по крайней мере, активные сопротивления статора и ротора двигателя АИР90Л4 в системе косвенного бездатчикового векторного управле-

ния, по сравнению со случаем, когда идентификатор отсутствует, обеспечивает:

- снижение средней статической погрешности вычисления угловой скорости ротора для максимальной скорости диапазона регулирования в 2 раза;
- снижение средней статической погрешности вычисления угловой скорости ротора для минимальной скорости диапазона регулирования в 1,3 раза;
- снижение максимальной динамической погрешности вычисления угловой скорости ротора в 1,6 раз;
- сохранение диапазона регулирования скорости $D = 7$ (если идентификация АД не выполняется диапазон снижается в 1,4 раза, $D = 5$).

Результаты моделирования системы косвенного бездатчикового векторного управления двигателями АИР132М4 и АИР315S4 при выполнении параметрической идентификации и без нее, также подтверждают тот факт, что выполнение параметрической идентификации АД обеспечивает снижение средней статической и максимальной динамической погрешностей вычисления скорости от 1,2 до 2 раз при сохранении диапазона регулирования.

Выводы

1. Определение активных сопротивлений статора и ротора АД позволяет сохранить динамические свойства системы косвенного бездатчикового векторного управления в заданном диапазоне регулирования угловой скорости. Это позволяет успешно применять данные системы ЭП для решения различных технологических задач.

2. Точность вычисления угловой скорости ротора при изменениях активных сопротивлений АД в широких пределах удается повысить в 1,2–2 раза за счет использования алгоритмов параметрической идентификации АД и настройки параметров наблюдающего устройства и регуляторов соответственно значениям изменяющихся параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Опейко, О. Ф.** Тяговый электропривод с бездатчиковой системой векторного управления / О. Ф. Опейко, А. И. Пташник, В. И. Хильмон // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2010. – № 6. – С. 37–43.
2. **Фираго, Б. И.** Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
3. **Однолько, Д. С.** Алгоритм параметрической идентификации асинхронного двигателя и его экспериментальное тестирование / Д. С. Однолько // Вестник Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского. – 2013. – № 4. – С. 9–14.
4. **Опейко, О. Ф.** Микропроцессорные средства в автоматизированном электроприводе: учеб. пособие / О. Ф. Опейко, Ю. Н. Петренко. – Минск: Амалфея, 2008. – 340 с.
5. **Однолько, Д. С.** Параметрическая идентификация асинхронного двигателя в составе частотно-регулируемого электропривода при неподвижном роторе / Д. С. Однолько // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2014. – № 2. – С. 64–72.

Поступила 10.03.15

Odnolko D. S.

MATHEMATICAL SIMULATION OF SENSORLESS VECTOR CONTROL INDUCTION MOTOR UNDER PARAMETRIC PERTURBATIONS

Developed a mathematical simulation model of the system of indirect sensorless vector control induction motor. The studies of the sensitivity of the electric drive system to parametric perturbations, in particular to the change in resistance of the stator and rotor. Presents an analysis of quality of work the system: estimation accuracy of the angular velocity of the rotor and the stability of the dynamic properties of the system, using the algorithms of parametric identification of an induction motor and without them.